

Echangeurs de chaleur

Pascal Tobaly

14 mars 2002

IUT de St Denis

Licence Professionnelle

Module Ingénierie des systèmes multitechniques.

Dans le cadre de ce module, un petit nombre d'heures est consacré aux installations thermiques. Le sujet étant très large et ne pouvant être traité ici de manière complète, j'ai choisi de traiter le composant le plus répandu, à savoir l'échangeur thermique.

Table des matières

1 Principe général :	2
2 Configurations géométriques	3
2.1 Echangeurs à tubes et calandres	3
2.2 Echangeurs tubulaires coaxiaux :	3
2.3 Echangeurs à courants croisés :	4
2.4 Echangeurs à plaques	4
3 Calcul des échangeurs	5
3.1 Quelques rappels :	5
3.1.1 Calorimétrie :	5
3.1.2 Notion de débit :	6
3.1.3 Puissances	6
3.2 Méthode de l'écart de température logarithmique moyen	7
3.2.1 Calcul du flux échangé.	9
3.2.2 Profils de température :	9
3.2.3 Cas du contre courant :	10
3.3 Méthode du nombre d'unités de transfert (NUT)	11
3.3.1 Définitions :	12

3.3.2	Calcul du NUT	13
3.3.3	Utilisation de la méthode	13
3.3.4	Cas particuliers	15

4 Bibliographie 15

Introduction :

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur. On estime à 90% la part des transferts d'énergie réalisée par les échangeurs de chaleur dans l'industrie.

1 Principe général :

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid. En d'autres termes, le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide chaud. Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi d'où le nom de l'appareil. On le voit, le principe général est simple mais il donne lieu à un grand nombre de réalisations différentes par la configuration géométrique. Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. On vient de le dire, la quantité de chaleur transférée dépend de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres ce qui rend une étude précise de ces appareils assez complexe. Les flux de chaleur transférés vont aussi dépendre des températures d'entrée et des caractéristiques thermiques des fluides (chaleurs spécifiques, conductivité thermique) des fluides ainsi que des coefficients d'échange par convection. Ce dernier paramètre dépend fortement de la configuration des écoulements et une étude précise doit faire appel à la mécanique des fluides.

D'après ce qui précède, on voit bien qu'il y a différentes manières de traiter le problème. Une étude fine doit prendre en compte tous les paramètres et résoudre les problèmes de mécanique des fluides qui peuvent être très compliqués. Une telle approche est possible par des méthodes numériques à travers un logiciel approprié. Cette approche est très coûteuse mais tend à se répandre avec le développement des outils informatiques. Nous ne développerons pas cet aspect des choses et nous nous contenterons de donner quelques références pour le lecteur intéressé.

Par ailleurs, il existe des méthodes d'étude globales qui moyennant quelques hypothèses simples peuvent donner des résultats approximatifs qui seront suffisants dans la plupart des cas. Ces méthodes seront présentées ici de manière succincte.

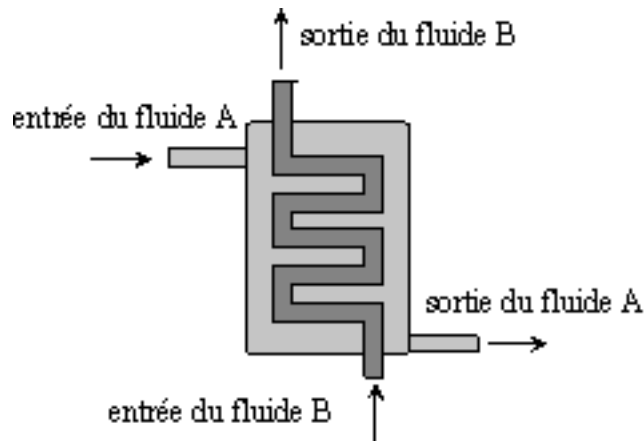


Figure 1

FIG. 1 – Echangeur à tube et calandre

2 Configurations géométriques

Les principales configurations d'échangeurs sont présentées ci-dessous :

2.1 Echangeurs à tubes et calandres

C'est de loin le type d'échangeur le plus répandu mais la part qu'il représente ne cesse de diminuer au profit de configurations plus efficaces. Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans un réservoir autour de tubes qui le traversent tandis que l'autre fluide circule à l'intérieur des tubes. Le modèle le plus simple sera constitué d'un réservoir dans lequel sera plongé un serpentin. Le modèle le plus courant est constitué d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale. On parle alors d'échangeur multitubulaire. Des parois bien placées permettent de forcer la circulation du fluide à travers les tubes de manière à ce qu'il effectue un ou même plusieurs aller-retours, voir figure x. On trouve assez fréquemment des chicanes dans le réservoir pour forcer la circulation du fluide à travers tout le réservoir sans quoi le fluide aurait tendance à prendre le plus court chemin entre l'entrée et la sortie.

2.2 Echangeurs tubulaires coaxiaux :

Dans cette configuration, l'un des fluides circule dans le tube central tandis que l'autre circule dans l'espace annulaire entre les deux tubes. On distingue deux types de fonctionnement selon que les 2 fluides circulent dans le même sens ou en sens contraire. Dans le premier cas on parle de configuration en co-courant (parfois appelé à tort en parallèle). Dans le deuxième cas, on parle de configuration en contre-courant. On trouve assez souvent ce type d'échangeurs dans l'industrie frigorifique en particulier pour les condenseurs à eau ou encore les groupes de production d'eau glacée.

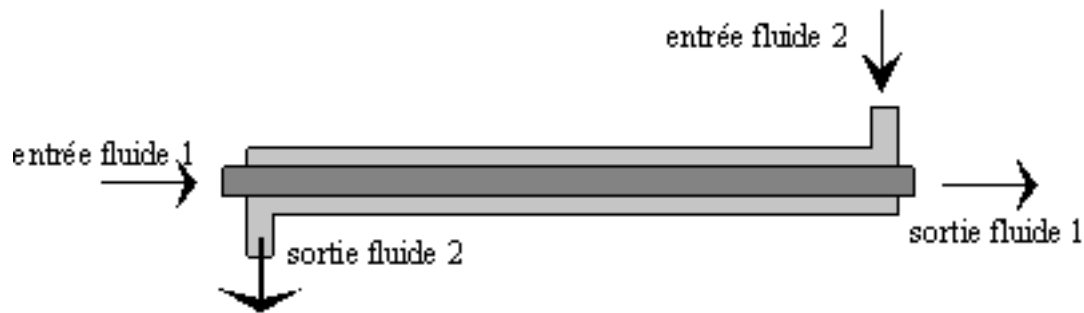


FIG. 2 – Echangeur tubulaire coaxial

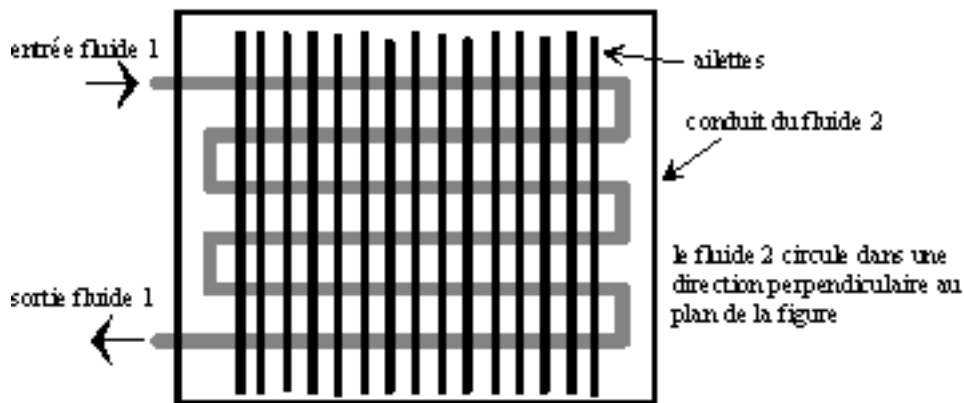


FIG. 3 – Echangeur à courants croisés

2.3 Echangeurs à courants croisés :

Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans une série de tubes tandis que l'autre fluide circule perpendiculairement autour des tubes. Dans la plupart des cas, c'est un liquide qui circule dans les tubes tandis que c'est un gaz qui circule autour. Les tubes sont presque toujours munis d'ailettes qui permettent d'augmenter le flux de chaleur échangée en augmentant la surface d'échange. L'exemple type de ce modèle d'échangeur est le radiateur de refroidissement qu'on trouve à l'avant de la plupart des véhicules à moteur.

2.4 Echangeurs à plaques

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques formées dont les alvéoles constituent les chemins empruntés par les fluides. les plaques sont assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter-plaques successifs. Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers les plaques. La figure 4 illustre le fonctionnement d'un tel échangeur. L'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité. En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité, ce qui est particulièrement utile lorsque des puissances importantes

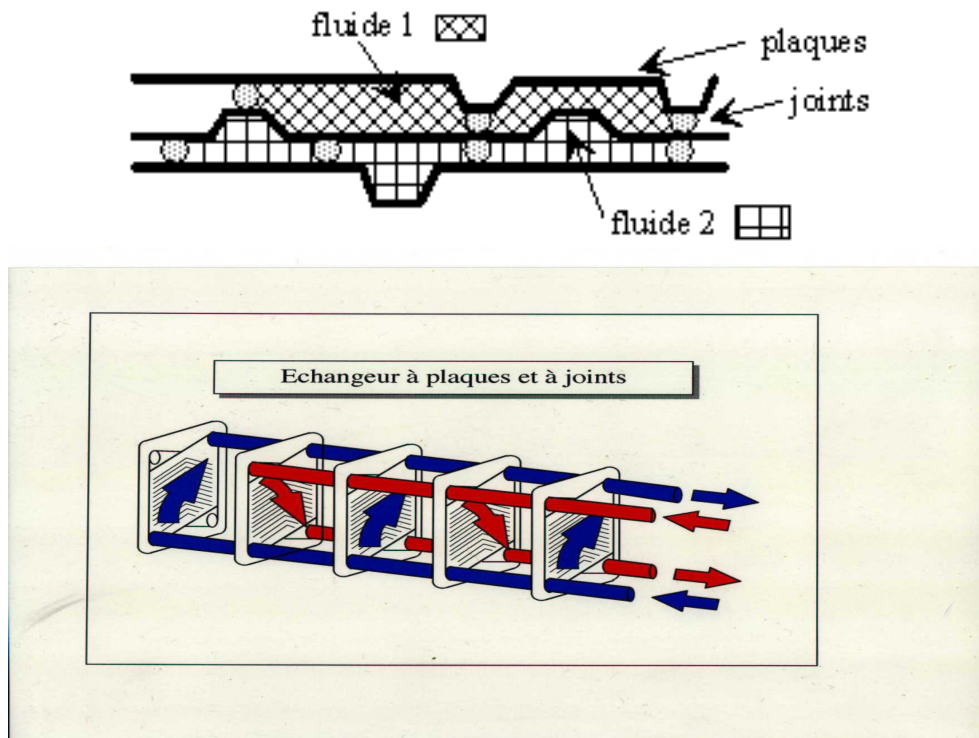


FIG. 4 – Echangeurs à plaques

doivent être échangées. Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) ou l'industrie nucléaire. Les plaques sont généralement en acier inoxydable en particulier dans l'agroalimentaire pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique. A noter que l'utilisation de joints en matières organiques réduit la gamme de températures de fonctionnement.

3 Calcul des échangeurs

3.1 Quelques rappels :

3.1.1 Calorimétrie :

pour une masse m de fluide de chaleur massique c_P la quantité de chaleur échangée à pression constante avec le milieu extérieur s'écrit comme la variation de son enthalpie :

$$Q_p = H_2 - H_1 = m (h_2 - h_1) = m c_P (T_2 - T_1)$$

avec

H l'enthalpie du fluide

h l'enthalpie massique (par exemple par kg)

c_P la chaleur massique (caractéristique de l'aptitude du fluide à absorber de la chaleur)

T la température du fluide

notes :

- Les quantités de chaleur s'expriment en Joule dans le système S.I.
- L'enthalpie peut être vue comme la réserve de chaleur contenue dans le fluide.
- Lorsque le fluide reçoit de la chaleur, cette quantité est positive, lorsqu'il en perd, elle est négative.
- La dernière égalité n'est pas valable lorsque le fluide change d'état (cas des condenseurs et des évaporateurs). Ce cas ne sera pas traité ici

3.1.2 Notion de débit :

le débit caractérise la quantité de matière passant à travers une surface donnée en un temps donné

On distingue le débit volumique et le débit massique.

Si la masse Δm occupant le volume ΔV passe à travers la surface pendant le temps Δt , les débits seront définis par

débit volumique :

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

et débit massique :

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

Les débits définis ci-dessus sont appelés débits moyens pendant le temps Δt et on obtiendra des débits instantanés en faisant tendre l'intervalle de temps vers zéro, ce qui donne :

$$\dot{m} = q_m = \frac{dm}{dt}$$

c'est cette dernière notation que nous emploierons par la suite.

Unité S.I. : Kg/s

3.1.3 Puissances

La puissance échangée est donnée par le rapport de la quantité d'énergie échangée au temps. Pour un fluide s'écoulant à travers un échangeur, elle s'écrit :

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \dot{m} (h_s - h_e)$$

où les indices e et s se réfèrent évidemment à l'entrée et à la sortie.

Les puissances s'expriment en Watt (W) dans le système S.I. ($1W = 1J/s$)

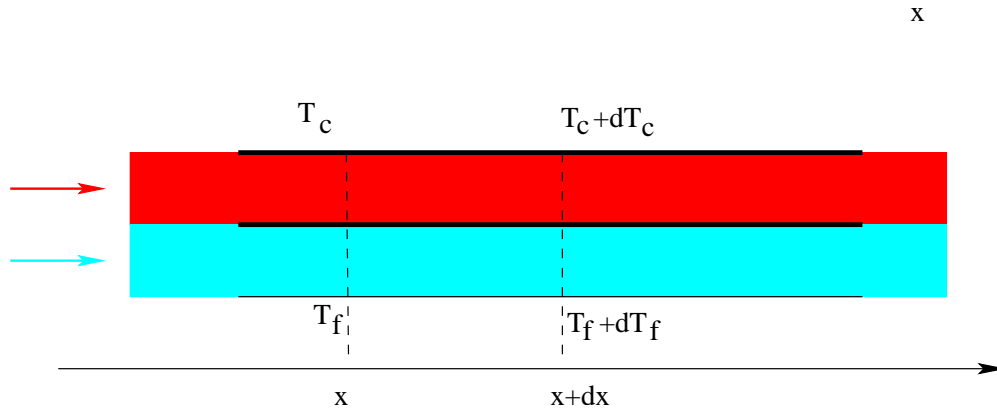


FIG. 5 – Élément d'échangeur de longueur dx

3.2 Méthode de l'écart de température logarithmique moyen

Cette méthode s'applique aux échangeurs coaxiaux. Nous développerons le calcul pour le cas du co-courant. Le calcul se mène de manière similaire pour le cas du contre-courant et sera laissé en exercice pour le lecteur consciencieux.

Considérons Un échangeur coaxial fonctionnant en co-courant : La figure 5 résume la situation : le fluide chaud entre avec la température T_{c_e} et ressort à la température T_{c_s} . De même, le fluide froid entre à la température T_{f_e} pour ressortir à la température T_{f_s} . Les fluides chaud et froid ont pour chaleurs massiques et débits respectivement : c_c , \dot{m}_c , c_f , \dot{m}_f .

La figure 6 montre un profil de température typique pour ce type de fonctionnement.

Tout au long de ce calcul, on notera ϕ le flux de chaleur passant du fluide chaud vers le fluide froid. Il sera donc nécessairement positif dans ce cas. Par définition :

$$\phi = \frac{dQ_{c \rightarrow f}}{dt}$$

Examinons le transfert de chaleur dans une portion d'échangeur de longueur dx entre les sections d'abscisse x et d'abscisse $x = dx$ (figure 5).

Le flux de chaleur $d\phi$ peut être évalué de différentes manières :

- Echange à travers la surface dS . Le flux est proportionnel à la différence de température entre les 2 fluides à cet endroit soit :

$$d\phi = K (T_c - T_f) dS$$

où K est un coefficient global d'échange de chaleur qui dépend des caractéristiques de l'écoulement et des fluides.

- perte de chaleur par le fluide chaud entre les sections en x et $x + dx$:

$$d\phi = -\dot{m}_c c_c dT_c = -\dot{m}_c c_c (T_c(x + dx) - T_c(x))$$

– gain de chaleur par le fluide froid :

$$d\phi = \dot{m}_f c_f dT_f = \dot{m}_f c_f (T_f(x + dx) - T_f(x))$$

note : On a implicitement supposé qu'il n'y avait pas de changement de phases ici.

Des deux dernières équations, on tire :

$$dT_c = -\frac{d\phi}{\dot{m}_c c_c}$$

et

$$dT_f = \frac{d\phi}{\dot{m}_f c_f}$$

et par différence :

$$d(T_c - T_f) = -d\phi \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f} \right)$$

soit en remplaçant $d\phi$ par son expression dans la première équation,

$$d(T_c - T_f) = -K(T_c - T_f) \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f} \right) dS$$

Pour alléger l'écriture, on note :

$$M = \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f} \right)$$

ce qui donne :

$$\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = -K M p dx$$

compte tenu de l'expression de l'élément de surface $dS = p dx$ où p est le périmètre de la section.

Ce qui donne après intégration pour une section d'abscisse x :

$$\ln(T_c(x) - T_f(x)) = -K M p x + \ln(T_{c_e} - T_{f_e})$$

soit

$$T_c(x) - T_f(x) = (T_{c_e} - T_{f_e}) \exp(-K M p x)$$

l'écart de température chute de manière exponentielle

Pour toute la longueur L de l'échangeur, on a donc :

$$\ln \left(\frac{T_{c_s} - T_{f_s}}{T_{c_e} - T_{f_e}} \right) = -K M p L = -K M S$$

où S est la surface d'échange totale.

3.2.1 Calcul du flux échangé.

On est maintenant en mesure de calculer le flux échangé en intégrant la première expression du flux puisqu'on connaît la variation de $T_c - T_f$. On a donc :

$$d\phi = K (T_{c_e} - T_{f_e}) \exp(-K M p x) p dx$$

ce qui s'intègre aisément en :

$$\phi = \int_0^L K (T_{c_e} - T_{f_e}) \exp(-K M p x) p dx = \left[-\frac{1}{M} (T_{c_e} - T_{f_e}) \exp(-K M p x) \right]_0^L$$

soit

$$\phi = -\frac{1}{M} [(T_{c_e} - T_{f_e}) \exp(-K M p L) - (T_{c_e} - T_{f_e})]$$

ce qui compte tenu du calcul précédent donne :

$$\phi = -\frac{1}{M} [(T_{c_s} - T_{f_s}) - (T_{c_e} - T_{f_e})]$$

puis en remplaçant M par sa valeur :

$$\phi = K p L \frac{(T_{c_s} - T_{f_s}) - (T_{c_e} - T_{f_e})}{\ln \left(\frac{T_{c_s} - T_{f_s}}{T_{c_e} - T_{f_e}} \right)}$$

soit

$$\phi = K S \Delta T_{LM}$$

en ayant pris soin de poser la différence de température logarithmique moyenne :

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{c_s} - T_{f_s}) - (T_{c_e} - T_{f_e})}{\ln (T_{c_s} - T_{f_s}) - \ln (T_{c_e} - T_{f_e})}$$

3.2.2 Profils de température :

On peut aussi établir le profil des températures pour chacun des fluides : Il suffit de reprendre les équations calorimétriques, Par exemple pour le fluide chaud :

$$dT_c = -\frac{d\phi}{\dot{m}_c c_c}$$

et de remplacer $d\phi$ par sa valeur, ce qui donne :

$$dT_c = -\frac{K}{\dot{m}_c c_c} (T_{c_e} - T_{f_e}) \exp(-K M p x) p dx$$

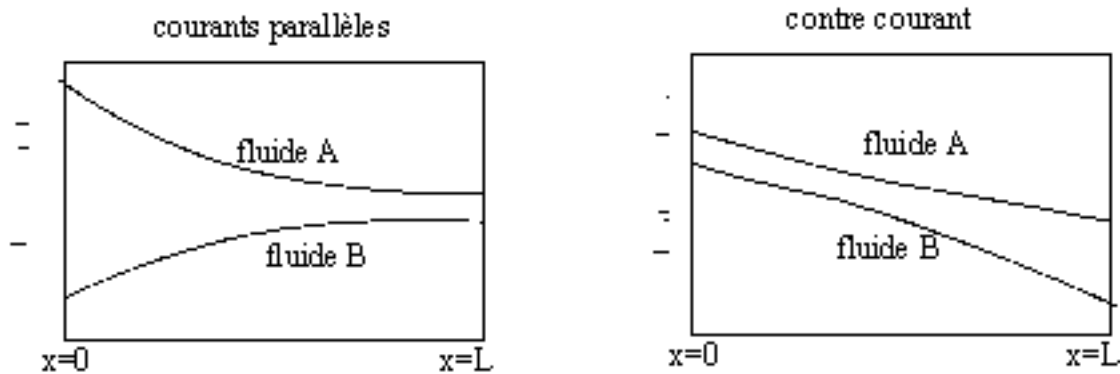


FIG. 6 – Profils de température

ce qui donne après intégration :

$$T_c = T_{c_e} + \frac{1}{\dot{m}_c c_c M} (T_{c_e} - T_{f_e}) [\exp(-K M p x) - 1]$$

on a donc un profil en exponentielle décroissante. La constante d'intégration ayant été fixée de telle sorte que $T_c(x) = T_{c_e}$ pour $x = 0$.

Le calcul se mène de manière similaire pour T_f (exercice) et donne :

$$T_f = T_{f_e} - \frac{1}{\dot{m}_f c_f M} (T_{c_e} - T_{f_e}) [\exp(-K M p x) - 1]$$

exercice : Montrer que dans ce cas, lorsque x tend vers l'infini, les 2 profils de température tendent vers une asymptote commune

3.2.3 Cas du contre courant :

Le calcul est laissé à titre d'exercice. Il se mène de manière similaire mais il est nécessaire de prendre quelques précautions. On supposera que le fluide chaud entre dans la section d'abscisse 0 et on examinera toujours le flux de chaleur du fluide "chaud" vers le fluide "froid". On est amené à introduire

$$M' = \frac{1}{\dot{m}_f c_f} - \frac{1}{\dot{m}_c c_c}$$

On a alors 3 cas possibles (voir les figures) :

$M' = 0$ Dans ce cas, l'intégration est triviale : $T_c - T_f = cte$ et les deux profils de température sont linéaires

$M' > 0$ Les profils de températures s'écartent si l'on parcourt l'échangeur dans le sens du fluide chaud.

$M' < 0$ Les profils se rapprochent.

Dans les deux cas où M' est différent de 0 on obtient encore :

$$\phi = KS\Delta T_{LM}$$

mais cette fois ci :

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{c_s} - T_{f_e}) - (T_{c_e} - T_{f_s})}{Ln(T_{c_s} - T_{f_e}) - Ln(T_{c_e} - T_{f_s})}$$

de même les profils de température s'écriront :

$$T_c = T_{c_e} - \frac{1}{\dot{m}_c c_c M} (T_{c_e} - T_{f_s}) [\exp(KM'px) - 1]$$

$$T_f = T_{f_s} - \frac{1}{\dot{m}_f c_f M} (T_{c_e} - T_{f_s}) [\exp(KM'px) - 1]$$

Remarque : Si l'on fait tendre la longueur de l'échangeur vers l'infini, il faut distinguer encore suivant le signe de M :

$M' > 0$ Dans ce cas, $\dot{m}_f c_f < \dot{m}_c c_c$ et la température de sortie du fluide froid devient égale à la température d'entrée du fluide chaud. Le flux de chaleur échangé s'écrit en valeur absolue :
 $\dot{m}_f c_f (T_{f_s} - T_{f_e}) = \dot{m}_f c_f (T_{c_e} - T_{f_e})$

$M' < 0$ Dans ce cas, $\dot{m}_c c_c < \dot{m}_f c_f$ et la température de sortie du fluide chaud devient égale à la température d'entrée du fluide froid. Le flux de chaleur échangé s'écrit en valeur absolue :
 $-\dot{m}_c c_c (T_{c_s} - T_{c_e}) = \dot{m}_c c_c (T_{c_e} - T_{f_e})$

On remarque que dans les deux cas, le flux échangé s'écrit comme le produit du débit thermique minimum par la différence de température maximum :

$$\phi_{max} = (\dot{m}c)_{min} (T_{c_e} - T_{f_e}) = (\dot{m}c)_{min} \Delta T_{max}$$

où $(\dot{m}c)_{min}$ désigne évidemment le plus petit des deux débits thermiques, ΔT_{max} étant le plus grand écart de température observable compte tenu des températures d'entée.

Ce résultat sera utilisé pour développer la méthode NUT dans le paragraphe suivant.

3.3 Méthode du nombre d'unités de transfert (NUT)

La méthode que nous venons de voir n'est valable que pour les échangeurs coaxiaux. Pour les autres types d'échangeurs, une méthode plus générale existe que nous allons décrire succinctement ci-dessous :

La méthode fait référence à une situation idéale à savoir le cas de l'échangeur à contre courant de longueur infinie envisagé à la fin du paragraphe précédent.

3.3.1 Définitions :

Debit thermique : On appelle débit thermique le produit $\dot{m}c$ pour un fluide donné.

Flux maximum : C'est le flux maximum échangé dans un échangeur à contre-courant de longueur infinie soit

$$\phi_{max} = (\dot{m}c)_{min} \Delta T_{max}$$

Efficacité de l'échangeur : C'est l'efficacité par rapport au flux maximum défini ci-dessus :

$$E = \frac{\phi}{\phi_{max}}$$

où ϕ est le flux réellement échangé.

Rapport de déséquilibre : c'est le rapport des débits thermiques soit :

$$R = \frac{(\dot{m}c)_{min}}{(\dot{m}c)_{max}}$$

Nombre d'unités de transfert :

On appelle nombre d'unités de transfert, le nombre sans dimension :

$$\frac{KS}{\dot{m}c}$$

On distingue le nombre d'unités de transfert du côté chaud :

$$NUT_c = \frac{KS}{(\dot{m}c)_c}$$

et de même le nombre d'unités de transfert du côté froid :

$$NUT_f = \frac{KS}{(\dot{m}c)_f}$$

Dans la pratique, seul le NUT correspondant au débit thermique minimum est utile. On le notera NUT sans préciser d'indice :

$$NUT = \frac{KS}{(\dot{m}c)_{min}}$$

L'idée de la méthode du NUT consiste à exprimer l'efficacité E de l'échangeur en fonction des 2 paramètres R et NUT pour chaque configuration d'échangeur. On dispose alors d'une fonction générale indépendante des conditions particulières de température ou de débit qui permet de calculer rapidement les flux mis en jeu sans connaître les températures de sortie. Remarquons que les trois grandeurs utilisées ici E, R, NUT sont sans dimension ce qui fait toute l'efficacité de la méthode.

3.3.2 Calcul du NUT

Pour chaque type d'échangeur, l'expression de la fonction générique $E = E(R, NUT)$ doit être développée une fois pour toutes. Nous développerons le cas du co-courant qui est le plus simple et nous donnerons le résultat pour quelques autres configurations. Dans certains cas, E est donnée graphiquement sous la forme d'une série de courbes pour différentes valeurs du paramètre R . Les constructeurs peuvent aussi fournir de tels diagrammes pour leurs appareils. Enfin, il existe aussi un certain nombre de programmes permettant ce type de calculs, certains sont accessibles sur internet et peuvent même effectuer des calculs en ligne (voir la bibliographie)

Nous allons développer le calcul dans le cas le plus simple, soit le co-courant. Pour cela, revenons à l'expression du flux total échangé dans ce cas :

$$\phi = -\frac{1}{\left(\frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f}\right)} [(T_{c_e} - T_{f_e}) \exp(-K M p L) - (T_{c_e} - T_{f_e})]$$

$$\phi = \frac{T_{c_e} - T_{f_e}}{\left(\frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f}\right)} \left[1 - \exp\left(-K S \left(\frac{1}{\dot{m}_c c_c} + \frac{1}{\dot{m}_f c_f}\right)\right) \right]$$

Par définition : $E = \frac{\phi}{\phi_{max}}$ soit

$$E = \frac{\phi}{(\dot{m}c)_{min} (T_{c_e} - T_{f_e})} = \frac{1}{\left(\frac{(\dot{m}c)_{min}}{\dot{m}_c c_c} + \frac{(\dot{m}c)_{min}}{\dot{m}_f c_f}\right)} \left[1 - \exp\left(-\frac{K S}{(\dot{m}c)_{min}} \left(\frac{(\dot{m}c)_{min}}{\dot{m}_c c_c} + \frac{(\dot{m}c)_{min}}{\dot{m}_f c_f}\right)\right) \right]$$

ce qui, compte tenu des définitions données plus haut se réduit à :

$$E = \frac{1 - \exp(-NUT(1 - R))}{1 - R}$$

Exercice : Montrer que dans le cas de l'échangeur à contre courant, l'expression de l'efficacité est donnée par :

$$E = \frac{1 - \exp(-(1 - R) NUT)}{1 - R \exp(-(1 - R) NUT)}$$

Attention, il y a lieu de distinguer 2 cas pour le calcul selon que $\dot{m}_c c_c < \dot{m}_f c_f$ ou l'inverse, l'expression finale étant identique dans les deux cas.

Pour les autres configurations d'échangeurs, les calculs seront plus compliqués et on se reportera aux ouvrages spécialisés (voir bibliographie, par exemple l'ouvrage de J. Padet. [1] p 43) ou encore aux notices des constructeurs.

3.3.3 Utilisation de la méthode

Le problème le plus courant consiste à déterminer les performances attendues d'un échangeur de type donné. C'est à dire d'évaluer la puissance pouvant être échangée avec des débits et des températures d'entrée données.

Dans ce cas, il suffit de calculer R puis le NUT puisqu'on connaît les caractéristiques de l'échangeur et les débits ce qui permet de calculer E à l'aide d'une des formules évoquées en

3.3.2. Il ne reste plus qu'à calculer le flux par $\phi = E\phi_{max}$. Les températures de sortie viennent ensuite par :

$$\begin{aligned}\phi_c &= \dot{m}_c c_c (T_{c_s} - T_{c_e}) \\ \phi_f &= \dot{m}_f c_f (T_{f_s} - T_{f_e})\end{aligned}$$

Exemple :

On désire installer un échangeur de chaleur pour distribuer dans un bâtiment l'énergie vendue par le service municipal de chauffage urbain. Ce service met à la disposition de ses usagers un circuit primaire dans lequel l'eau circule de l'eau chaude. Pour le bâtiment considéré, le contrat spécifie que le débit dans le circuit primaire est de 5400 kg/heure et que la température d'arrivée d'eau est de 90°C. Le cahier des charges spécifie que la température de retour ne doit pas être inférieure à 75°C. Du côté du circuit secondaire qui doit distribuer la chaleur dans le bâtiment, on estime qu'en régime permanent, la température de retour des radiateurs (c'est à dire la température T_{f_e} de l'échangeur) est de l'ordre de 40°C. On estime la puissance nécessaire pour chauffer le bâtiment à environ 80kW.

On envisage d'utiliser un échangeur de type coaxial en contre-courant. Le constructeur annonce une surface d'échange de 5m².

Le débit de l'eau du circuit secondaire doit être de 0,5 kg/s

Questions : Evaluer la puissance échangée dans ces conditions et calculer les températures de sortie. L'échangeur satisfait-il les conditions du cahier des charges.

Données :

- Chaleur massique de l'eau : $c_p = 4180 J K^{-1} kg^{-1}$
- Le coefficient global d'échange évalué dans les conditions de fonctionnement considérées est de $K = 800 W K^{-1} m^{-2}$.

Solution :

On calcule tout d'abord le rapport de déséquilibre R ainsi qu le NUT :

$$R = \frac{(\dot{m}c)_{min}}{(\dot{m}c)_{max}} = \frac{\dot{m}_f c_f}{\dot{m}_c c_c} = \frac{1}{3}$$

$$NUT = \frac{KS}{(\dot{m}c)_{min}} = 1.914$$

l'efficacité peut alors être calculée (contre courant) :

$$E = \frac{1 - \exp(-(1-R)NUT)}{1 - R \exp(-(1-R)NUT)} = 0.795$$

le flux de chaleur est donc égal à :

$$\phi = E\phi_{max} = E.\dot{m}_f c_f (T_{c_e} - T_{f_e}) = 83077W$$

Les températures de sortie peuvent alors être calculées :

$$T_{c_s} = T_{c_e} - \frac{\phi}{\dot{m}_c c_c} = 76,75^\circ C$$

$$T_{f_s} = T_{f_e} + \frac{\phi}{\dot{m}_f c_f} = 79,75^\circ C$$

On notera que la température de sortie d'eau froide est supérieure à celle de sortie d'eau chaude, résultat qui ne peut être obtenu avec un échangeur en configuration co-courant.

L'échangeur répond au cahier des charges puisque l'eau retournant à la centrale de production d'eau chaude a une température supérieure à $75^\circ C$. De plus la puissance échangée est suffisante pour chauffer le bâtiment.

Un autre type de problème sera de déterminer la surface d'échange nécessaire pour faire fonctionner un échangeur dans des conditions données. On est amené dans ce type de problèmes à calculer le NUT en inversant la formule $E = f(R, NUT)$. On peut ensuite tirer la surface de la valeur du NUT ainsi calculée. Un exemple de ce type sera traité en exercice.

3.3.4 Cas particuliers

Deux cas particuliers importants sont à signaler :

Le cas déjà rencontré où les deux débits thermiques sont égaux. Seule la configuration contre courant pose problème ici. Dans un tel cas, $R = 1$ et l'expression de E devient indéterminée (du type $\frac{0}{0}$). L'indétermination peut être levée par exemple par la règle dite de l'Hôpital. Ce qui donne, vous pourrez le vérifier à titre d'exercice :

$$E = \frac{NUT}{1 + NUT}$$

Le deuxième cas est plus intéressant. Il s'agit du cas $R = 0$.

Ce cas peut être obtenu de deux manières différentes

Soit $(\dot{m}c)_{min} \ll (\dot{m}c)_{max}$. Ce cas présente peu d'intérêt

soit $(\dot{m}c)_{max} \rightarrow \infty$. Ce cas plus intéressant correspond aux échangeurs à changement de phase (condenseurs et évaporateurs) pour lesquels, la température du fluide changeant de phase reste constante. (soit $\Delta T \rightarrow 0$). On peut montrer que pour toutes les configurations géométriques, l'expression de l'efficacité se réduit alors à :

$$E = 1 - \exp(-NUT)$$

On traitera quelques exercices sur ce thème.

4 Bibliographie

La plupart des ouvrages traitant des transferts de chaleur ont un chapitre sur les échangeurs de chaleur.

L'essentiel de ce cours est inspiré de 2 ouvrages[1, 2].

Références

- [1] Echangeurs thermiques de J. Padet Editions MASSON 1994 (développe surtout l'aspect calcul)
- [2] Technologie des échangeurs thermiques par A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. mercier, R. Vidil Editions Techniques de l'Ingénieur (Ce dernier ouvrage contient un grand nombre d'informations techniques)
- [3] Transferts de chaleur de J. Crabol (Tome 2) editions Masson 1990 (peut aussi être consulté avec profit)

Quelques liens sur Internet

Références

- [1] [http ://www.calixo.net/braun/conserven/echangeur.htm](http://www.calixo.net/braun/conserven/echangeur.htm)
Site en Français sur la pasteurisation
avec introduction aux échangeurs de chaleur
- [2] [http ://www.greth.org](http://www.greth.org)
Site en français du groupe de recherche sur les échangeurs thermiques
fournit de la documentation et des outils de calcul numérique
A noter un outil de calcul simple sous Excel à télécharger sur la
page :[http ://www.greth.org/francais/outil_de_calcul.html](http://www.greth.org/francais/outil_de_calcul.html)
- [3] [http ://www.cheresources.com/hteffzz.shtml](http://www.cheresources.com/hteffzz.shtml)
Calcul d'efficacité (en Anglais)
- [4] [http ://www.me.wustl.edu/ME/labs/thermal/me372b5.htm](http://www.me.wustl.edu/ME/labs/thermal/me372b5.htm)
Description de travaux pratiques dans une université américaine avec Rappel des méthodes DTLM et NUT
- [5] [http ://www.processassociates.com/process/tools.htm](http://www.processassociates.com/process/tools.htm)
Calculateur en ligne (Lire la notice en haut de page)
Le lien suivant pointe sur un calculateur de températures d'entrée/sortie pour différentes configurations
[http ://www.processassociates.com/process/heat/tertem.htm](http://www.processassociates.com/process/heat/tertem.htm)
- [6] [http ://efftech.tripod.com/hes.htm](http://efftech.tripod.com/hes.htm)
Programme de calcul d'échangeurs
Une version éducation est proposée au téléchargement
Je n'ai pas encore bien regardé ce que ça donne mais ça a l'air pas mal
- [7] [http ://www.htcsoftware.com](http://www.htcsoftware.com)
Programme de calcul professionnel
Je ne sais pas ce que ça vaut, Je n'ai pas essayé
Une version d'essai est proposée au téléchargement